

4. Боярских И.Г., Васильев В.Г., Кукушкина Т.А. Содержание флавоноидов и гидроксикоричных кислот в *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в популяциях Горного Алтая // Раст. ресурсы. – 2014. – Вып. 1. – С. 105–121.
5. Применение методов биотестирования для индикации закономерностей варьирования фенотипических и цитогенетических изменений растений-индикторов в зависимости от степени тектонической нарушенности зоны произрастания / А.А. Вьюхина, Е.И. Омельченко, Е.И. Шиманская и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2013. – № 1. – С. 45–51.
6. Запрометов М.Н. Фенольные соединения и их роль в жизни растения. – М. : Наука, 1996. – 45 с.
7. Куликова А.И., Боярских И.Г. Особенности формирования репродуктивных структур у тератной формы *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) // Бот. журн. – 2014. – Т. 99, № 2. – С. 193–205.
8. Куликова А.И., Боярских И.Г. Репродуктивная способность *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в локальной зоне геолого-геофизической неоднородности Горного Алтая // Сиб. эколог. журнал. – 2015. – № 4. – С. 608–616.
9. Влияние тектонических нарушений (дегазация, наведенные токи, вариации геомагнитного поля) севера Русской плиты на окружающую среду (на примере Архангельской области) / Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, В.В. Беляев и др. // Вестн. КРАУНЦ. – 2009. – № 2, вып. 14. – С. 77–89.
10. Никитский В.Е., Глебовский Ю.С. Магниторазведка. Справочник геофизика. – М. : Недра, 1980. – 367 с.
11. Вариации содержания Ве-7 в приземном слое атмосферы на средних широтах / Т.Б. Петрова, П.С. Микляев, В.К. Власов и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. – 2009. – Т. 50, № 5. – С. 396–401.
12. Горбушина Л.В., Зимин Д.Ф., Сердюкова А.С. Радиометрические и ядерногеофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых : учеб. пособие. – М. : Атомиздат, 1970. – 376 с.
13. Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. – М. : ОИФЗ РАН, 2002. – 130 с.
14. Boyarskikh I.G., Shitov A.V. Intraspecific variability of plants: The impact of active local faults / ed. by I.V. Florinsky // *Man and the Geosphere*. – New York : Nova Science, 2010. – P. 145–167.
15. Change in biochemical and morphological characteristics of *Lonicera Caerulea* in tectonically active zone of the Dzhazator River Valley (Altai Mountains) / I.G. Boyarskikh, S.A. Khudyaev, S.G. Platonova et al. // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2012. – Vol. 48, No. 7. – P. 747–760.
16. *Tectonic Faults: Agents of Change on a Dynamic Earth* / ed. by M.R. Handy, G. Hirth, N. Hovius. – Cambridge : MIT Press, 2007. – 446 p.
17. Heads M. Biological disjunction along the West Caledonian fault, New Caledonia: A synthesis of molecular phylogenetics and panbiogeography // *Botanical Journal of the Linnean Society*. – 2008. – Vol. 158, No. 3. – P. 470–488.
18. Spivak A.A. Manifestation of fault zones in geophysical fields // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – Vol. 5 (2). – P. 507–525.
19. Trifonov V.G., Karakhanian A.S. Active faulting and human environment // *Tectonophysics*. – 2004. – Vol. 380, No. 3–4. – P. 287–294.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РЕАКТОР ИРТ-Т И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В.А. Варлачев

Томский политехнический университет, Томск, Россия, varlachev@tpu.ru

THE RESEARCH REACTOR RRT-T AND ITS USE IN BASIC AND APPLIED RESEARCH

V.A. Varlachev

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Благодаря своим замечательным свойствам (электронейтральность, наличие магнитного момента и др.) нейтроны являются уникальным инструментом исследования структуры, динамики и свойств вещества, что определило их широкое использование в самых различных областях науки: физике, химии, биологии, геофизике, материаловедении, медицине и т.д. Как свидетельствует мировой опыт, непрерывно растет использование нейтронного излучения в прикладных целях, поскольку сегодня самые передовые направления в развитии техники и технологий получения новых материалов (в том числе и нанотехнологий) рождаются из достижений вы-

шеперечисленных областей науки. Поэтому исследовательские ядерные реакторы играют важную роль в решении научно-технических задач по созданию новой техники, развитию отраслей промышленности, требующих принципиально новых методов оперативного контроля технологических процессов, получению веществ и материалов с заданными свойствами.

Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т был введен в эксплуатацию в 1967 г. В период с 1977 по 1984 гг. была проведена коренная реконструкция реактора, которая позволила повысить тепловую мощность реактора с 2 до 6 МВт. Можно утверждать, что в результате ре-

конструкции построен новый реактор. В связи с тридцатилетним сроком эксплуатации реактора в 2014–2015 гг. было проведено техническое освидетельствование оборудования и сооружений реактора. По результатам, которого срок его эксплуатации продлен до 2035 г.

Одной из важных задач, выполняемых на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т, является подготовка высококвалифицированных специалистов в области разработки и эксплуатации ядерных установок [14].

Реактор ИРТ-Т до сих пор занимает особое место в ряду других – это единственный исследовательский реактор на территории Сибири и Дальнего Востока. В силу этого на нем развивались и развиваются исследования, в которых заинтересованы научные и производственные организации региона непосредственно связанные с изучением природных ресурсов и развитием производительных сил. В отличие от других реакторов, на которых большое внимание уделялось работам по ядерной физике, радиационному материаловедению и т.д., на ИРТ-Т систематические исследования проводились в основном по нейтронно-активационному анализу, радиацион-

ной физике и химии. Для проведения этих исследований в ходе реконструкции реактора была создана соответствующая экспериментальная база (рис. 1).

Реактор оборудован десятью горизонтальными экспериментальными (ГЭК) и 14 вертикальными (ВЭК) каналами. При работе реактора на мощности 6 МВт максимальная плотность потока тепловых нейтронов $1,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, а быстрых – $2,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Традиционно, начиная с 1967 года, на ИРТ-Т продолжают работы по нейтронно-активационному анализу (НАА). Для его реализации на реакторе создано соответствующее вспомогательное оборудование, которое обеспечивает [12]:

- экспрессную доставку образцов с позиции облучения на позицию измерения наведенной активности;
- возможность облучения проб большого объема (аспирационные и седиментационные фильтры и т.д.) в целях мониторинга природной среды;
- возможность облучения анализируемых проб в потоке нейтронов различных энергий.

С помощью указанного оборудования на базе ИРТ-Т ТПУ выполняются работы фундаментального и прикладного значения:

- по изучению уровней накопления и форм нахождения радиоактивных элементов в горных породах, рудах и минералах с целью радиогеохимической типизации рудно-магматических образований;
- по оценке редкометальной геохимической специализации и потенциале угольных бассейнов и месторождений Центральной Сибири;
- по прогнозированию и поиску новых месторождений нефти и газа радиогеохимическими методами;
- по оценке влияния деятельности предприятий ядер-

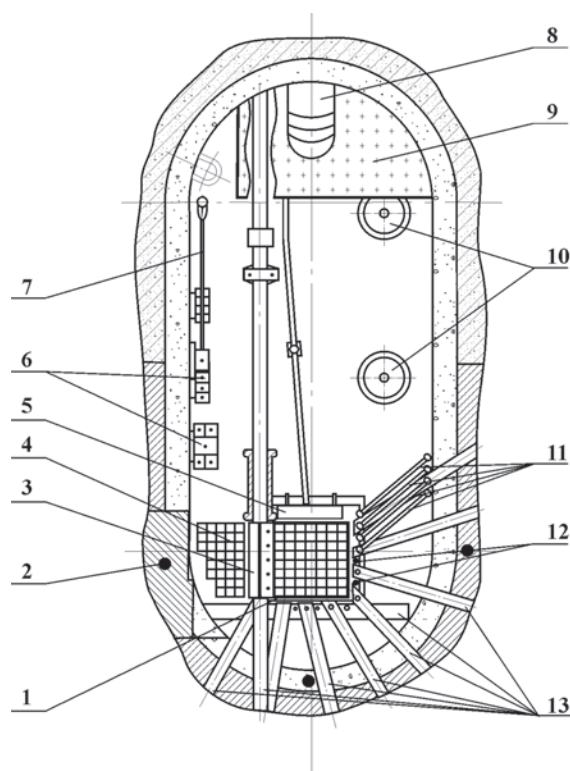


Рис. 1. Поперечный разрез реактора: 1 – корпус активной зоны; 2 – каналы для измерения температуры бетона; 3 – бериллиевый блок; 4 – внутренняя тепловая сборка; 5 – генератор активности; 6 – временное хранилище ТВС; 7 – устройство для транспортировки ТВС; 8 – трубопровод напорный; 9 – распределительная емкость; 10 – клапаны естественной циркуляции; 11 и 12 – вертикальные экспериментальные каналы; 13 – горизонтальные экспериментальные каналы

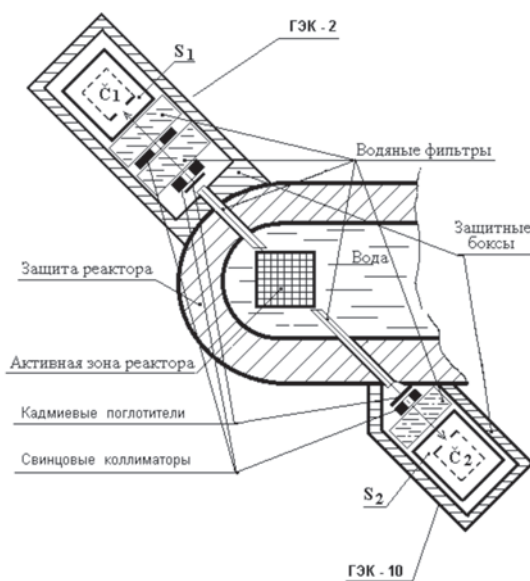


Рис. 2. Схема эксперимента. C_1, C_2 – Черенковские спектрометры; S_1, S_2 – Сцинтилляционные счетчики

но-энергетического и топливно-энергетического комплексов региона на состояние и динамику загрязнения среды обитания человека с учетом трудностей реабилитации естественных территорий в условиях Сибири;

- по определению уровня накопления редких и радиоактивных элементов в биосубстратах (кровь, волосы и др.), органах и тканях человека для целей мониторинга территорий.

Аналитические возможности методов НАА на базе исследовательских ядерных реакторов уже сейчас позволяют перейти к количественному определению малых элементов на уровне их фоновых концентраций, использованию отрицательных литологических аномалий, изучению геохимического равновесия между редкими и породообразующими элементами и т.д. Все это очень важно для исследования процессов миграции и аккумуляции углеводородов в осадочных бассейнах.

Кроме того, методики НАА используются для выявления закономерностей распределения микроэлементов по компонентам и функциям нефти Западной Сибири, поведения металлов в процессах переработки нефтяного сырья [13]. Эти данные позволяют определить форму нахождения элементов в нефти, их принадлежность соответствующим элементоорганическим соединениям или внутри молекулярным комплексам, характер связи металла, что в свою очередь может быть применено при прогнозировании химических свойств отдельных компонентов нефти, выбора путей рациональной переработки нефтяного сырья и квалифицированного использования нефтяных остатков [1, 13].

НАА преимущественно в инструментальном варианте широко использовался в арсенале методов геолого-геохимических исследований. Возможность определения до 30 элементов на кларковом уровне во всех разновидностях горных пород и минералов позволяет решать не только прикладные, но и фундаментальные задачи геохимии. Методами НАА, методом запаздывающих нейтронов и осколочной нейтронной радиографии на базе исследовательского ядерного реактора проводятся ядерно-геохимические исследования на обширной территории юга Западной Сибири, Хакасии, Алтая, Красноярского края, Эвенкии и Бурятии. Выполняется около полумиллиона элементо-определений в год. Решаются прикладные задачи поиска и разведки полезных ископаемых: золота, алмазов, платиноидов, редких и радиоактивных элементов. Выполнена работа по оценке уровня накоплений редких и радиоактивных элементов в углях Кузбасса, нефтях и торфах Томской области. Проводится эколого-геохимический мониторинг территорий на содержание токсичных элементов в воде, почвах, снеге, растительных, биологических и других объектах (Рихванов Л.П. и др. 2002–2005 гг.) [2, 3, 16–18]. В сотрудничестве с МАГАТЭ выполняются многолетняя программа по контролю качества аналитических работ и созданию международных стандартных образцов химического состава природных объектов.

Для получения полупроводниковых материалов с заданными электрофизическими характеристиками разработана и внедрена на реакторе технология ядер-

ного легирования кремния (ЯЛК). Автоматизированная установка для ЯЛК слитков кремния большого диаметра создана на ГЭК-4. Со стороны этого канала вдоль грани АЗ расположена бериллиевая сборка, окружающая канал и имеющая размеры 572х648х660 мм. При расчете и проектировании сборки решалась задача обеспечения однородного облучения образцов большого размера. Установка ориентирована на опытно-промышленное легирование слитков полупроводникового кремния. Максимальный градиент плотности потока тепловых нейтронов по диаметру этого канала достигает 17%. Для достижения высокой пространственной однородности легирования была разработана математическая модель нейтронного поля и алгоритм движения в нем контейнеров со слитками. Реализация данной модели позволила получить в пространстве контейнера диаметром 130 и длиной 700 мм объемную неоднородность облучения не хуже 5% относительных [9, 11]. Производительность созданной технологии ЯЛК равна 5000 кг для слитков кремния диаметром 5 дюймов и конечный номинал удельного электрического сопротивления 60 Ом·см. Установка не имеет аналогов в России.

Одним из перспективных научных направлений, которое развивается на исследовательском реакторе, является разработка методов и технологий получения короткоживущего технеция-99м для медицинской диагностики с использованием реакции радиационного захвата. Как известно, радиофармпрепараты технеция широко используются в мировой ядерной медицине для выявления на ранних стадиях онкологических заболеваний, заболеваний сердечнососудистой системы, головного мозга и других важнейших органов и тканей. В настоящее время на ядерном реакторе создано производство сорбционных генераторов технеция-99м на основе обогащенного молибдена-98. Для облучения мишеней задействован центральный ВЭК реактора с потоком тепловых нейтронов $1,4 \cdot 10^{14}$ н/см·с, который позволяет получать активность молибдена-99 более 10 Ки на 1 г за 100 ч работы аппарата. Плановый объем производства составляет 300 генераторов в год, что обеспечивает потребности ядерной медицины Сибирского и Дальневосточного регионов [10, 15, 19, 20].

В университете разработана и создана экспериментальная установка (рис. 2) для поиска эмиссии π^0 -мезонов при вынужденном делении ядер ^{235}U нейтронами в ядерном реакторе [4, 5, 7].

Установка состоит из двух черенковских спектрометров полного поглощения для регистрации и измерения энергии двух γ -квантов от распада π^0 -мезона. Спектрометры расположены на выходах двух соосных ГЭК-ов и включены на совпадение. Для защиты детекторов от β , γ -нейтронных потоков в каналах размещены фильтры из борированной воды. Для режекции космического фона над каждым спектрометром размещены сцинтилляционные счетчики большой площади, работающие в режиме антисовпадений.

Электронная аппаратура установки выполнена в стандарте КАМАК и работает в линию с персональным компьютером. Система мониторинга параметров установки основана на высокостабильных карбидокремни-

евых светодиодах и радиоизотопных излучателях света.

Для имитации и учета эффекта наложения импульсов (pile-up) от фона из активной зоны реактора в измерениях с неработающим реактором осуществляется однофотонный подсчет фотокатодов ФЭУ черенковских спектрометров стабильными светодиодами. Энергетическое и временное разрешения спектрометров, эффективность регистрации заряженных частиц сцинтилляционными счетчиками исследованы на вторичном электронном пучке синхротрона нашего университета.

В предварительном 30-часовом сеансе измерений была исследована обнаружительная способность установки. После обработки событий по критериям соответствующим 90% вероятности регистрации событий в выделенной области не было обнаружено ни одного события. Таким образом, установка обеспечивает подавление фона до уровня $<10^{-5}$ событий/с. Такой уровень фона позволяет обнаружить пионы, рожденные с вероятностью менее $2 \cdot 10^{-13}$ на один акт деления ядра ^{235}U , при уровне достоверности 90%. В результате статистической обработки результатов проведенных экспериментов установлено самое сильное ограничение на вероятность эмиссии нейтральных пионов при вынужденном делении ядер урана-235 нейтронами равно $P_m/P_g \leq 5,3 \cdot 10^{-12}$ при уровне достоверности 90%.

Еще одной фундаментальной проблемой, связанной с процессом деления ядер, является проблема энергетического спектра γ -квантов, возникающих при этом делении. Известно, что энергетический спектр γ -квантов, возникающих в процессе деления тяжелых ядер нейтронами, в диапазоне энергий 1–7 МэВ хорошо изучен экспериментально и имеет вид экспоненты с обратным параметром наклона $E_0 = 0,9$ МэВ. Параметры спектра определяются статистическим характером снятия возбуждения с осколков деления ядер. В области энергий 7–20 МэВ экспериментальные данные об энергетическом спектре γ -излучения получены только на источниках спонтанно делящихся ядер ^{238}U , ^{252}Cf . Спектры характеризуются обратным параметром наклона $E_0 = 1,4 \pm 2,2$ МэВ. Выход γ -квантов в этой области энергий объясняется наличием высоковозбужденных состояний дочерних ядер, возникающих в процессе деления и, в том числе, прямым возбуждением гигантского дипольного резонанса.

В области энергий >20 МэВ существует противоречивая как теоретическая, так и экспериментальная ситуация. Из 6 проведенных экспериментов, в 3 зафиксирован выход γ -квантов с энергией >20 МэВ, в 3 других экспериментах установлен только верхний предел на выход. В 5 экспериментах использовались источники спонтанного деления ^{252}Cf .

Единственный эксперимент, проведен на импульсном ядерном реакторе ОИЯИ (Дубна), с целью обнаружения выхода γ -квантов с энергией >30 МэВ. В эксперименте было получено самое сильное ограничение на вероятность выхода γ -квантов. Теоретически, выход γ -квантов в диапазоне энергий (20–80 МэВ), обосновывается как результат когерентного тормозного излучения осколков деления ядер в кулоновском поле и зави-

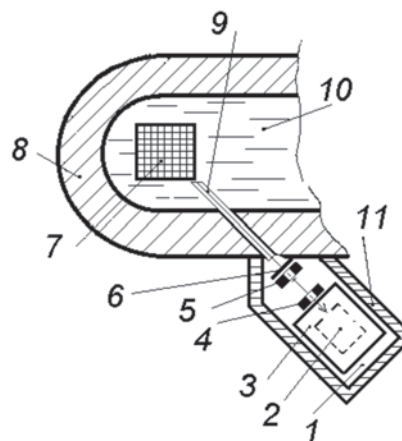


Рис. 3. Схема эксперимента на горизонтальном экспериментальном канале ядерного реактора: 1 – горизонтальный экспериментальный канал; 2 – NaI-спектрометр; 3 – система сцинтилляционных счетчиков, включенных по схеме антисовпадений; 4, 5 – свинцовые коллиматоры; 6 – кадмиевый поглотитель; 7 – активная зона; 8 – биологическая защита реактора; 9 – водяной фильтр; 10 – водный бассейн; 11 – защитный бокс

сит от фундаментальных характеристик процесса деления ядер, таких как: длина шейки деления, механизма ускорения (мгновенный, чисто кулоновский), квантово-механических поправок на эффект туннелирования осколков через потенциальный барьер. Результаты расчетов отличаются в разных моделях на несколько порядков.

На ИРТ-Т были проведены исследования высокоэнергетической части спектра γ -квантов из реакции деления ^{235}U нейтронами.

Эксперимент был выполнен на горизонтальном экспериментальном канале (рис. 3). Энергетический спектр измерялся с помощью NaI (TI)-спектрометра, с размерами кристалла $\varnothing 200$ мм, $l = 200$ мм (7,7 рад. длин). Для защиты детектора от потока нейтронов и уменьшения плотности потока γ -квантов до приемлемого уровня, между спектрометром и активной зоной реактора был помещен фильтр из дистиллированной воды длиной 300 см. Между входом свинцового коллиматора 1 и выходом коллиматора 2 расстояние 150 см. Диаметр отверстия обоих коллиматоров равен 2 см, длина 15 см. В результате, при мощности реактора $W = 6$ МВт, на детектор падал поток γ -квантов с интенсивностью $I = 5 \cdot 10^4$ γ /с.

Для защиты детектора от фона, обусловленного космическим излучением, использовалась пассивная защита – свинец, тяжелый бетон и активная защита – сцинтилляционные детекторы, окружающие NaI-спектрометр с боковых сторон и работающие в режиме антисовпадений. В результате проведенных экспериментов были получены следующие результаты [6, 8]:

- впервые определен вклад в энергетический спектр γ -квантов из активной зоны ядерного реактора

($E_\gamma = 12+36$ МэВ) от высоковозбужденных состояний дочерних ядер, возникающих в процессе деления, в том числе и за счет возбуждения и последующего распада гигантского дипольного резонанса;

- установлено самое сильное ограничение на вероятность выхода γ -квантов с энергией >36 МэВ (на два порядка величины выше, чем ограничение, полученное на импульсном ядерном реакторе ОИЯИ).

В настоящее время на ИРТ-Т продолжаются исследования по получению диагностических и терапевтических радиофармпрепаратов, модификации полимерных и кристаллических структур, созданию пучков выведенных нейтронов для нейтронно-графических исследований и нейтроннозахватной терапии, нейтронно-активационному анализу, созданию детекторов тепловых и быстрых нейтронов.

Литература

1. Алешин Г.Н., Глухов Г.Г. Современные методы определения микроэлементов в нефти и нефтепродуктах // Совершенствование методов анализа нефтей. – Томск, 1983. – С. 10–27.
2. Арбузов С.И., Ершов В.В., Рихванов Л.П. Редкометальный потенциал углей Минусинского бассейна. – Новосибирск : Гео, 2003. – 347 с.
3. Радиоактивные элементы в палеозойских углях Сибири / С.И. Арбузов, Л.П. Рихванов, А.В. Волостнов и др. // Геохимия. – 2005. – № 5. – С. 527–541.
4. Экспериментальный предел на вероятность эмиссии нейтральных пионов при вынужденном делении ядер урана-235 нейтронами / В.А. Варлачев, Г.Н. Дудкин, Ю.Ф. Кречетов и др. // Известия Вузов. Физика. – 2003. – Т. 46, № 9. – С. 26–32.
5. Поиск эмиссии n -мезонов при вынужденном делении ^{235}U нейтронами / В.А. Варлачев, Г.Н. Дудкин, Ю.Ф. Кречетов и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – Т. 80, вып. 3. – С. 171–173.
6. Варлачев В.А., Дудкин Г.Н., Падалко В.Н. Исследование высокоэнергетической части спектра γ -квантов из реакции деления ядер ^{235}U нейтронами // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. – Т. 71, № 11. – С. 1682–1686.
7. Варлачев В.А., Дудкин Г.Н., Падалко В.Н. Накопление ^{59}Ni в коррозионно-стойкой стали под действием потока нейтронов // Атомная Энергия. – 2005. – Т. 99, вып. 6. – С. 1–7.
8. Варлачев В.А., Дудкин Г.Н., Падалко В.Н. Существует ли когерентное тормозное излучение осколков деления ядер? // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Т. 82, вып. 7. – С. 440–444.
9. Варлачев В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. Особенности нейтронно-трансмутационного легирования кремния на исследовательских реакторах // Изв. Вузов. Физика. – 1998. – № 4. – С. 210–215.
10. Генерирование ^{99}Mo на реакторе ИРТ-Т / В.А. Варлачев, А.И. Рябчиков, Е.С. Солодовников и др. // Радиохимия. – 2006. – Т. 48, № 5. – С. 442–445.
11. Томский комплекс нейтронно-трансмутационного легирования кремния / В.А. Варлачев, Е.С. Солодовников, А.Н. Кузин и др. // Атомная энергия. – 1995. – Т. 79, вып. 1. – С. 38–40.
12. Глухов Г.Г., Диденко А.Н. Ядерный реактор ИРТ-Т НИИ ЯФ ТПУ в научных и прикладных исследованиях // Атомная энергия. – 1988. – Т. 64, вып. 5. – С. 366–370.
13. О распределении микроэлементов в Адсорбционно-хроматографических фракциях нефтяных смол / Л.Н. Горбунова, В.А. Варлачев, Г.Г. Глухов и др. // Нефтехимия. – 1980. – Т. 20, № 4. – С. 625–631.
14. Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т: Пособие по производственной практике и стажировке / В.А. Варлачев, О.Ф. Гусаров, С.А. Заболотнов и др. – Томск : Изд. ТПУ, 2002. – 56 с.
15. Диагностические возможности сцинтиграфии миокарда с технетрилом (МИБИ), меченным $^{99\text{m}}\text{Tc}$, полученным из экстракционного и сорбционного генераторов / Ю.Б. Лишманов, В.И. Чернов, Ж.В. Веснина и др. // Радиохимия. – 1997. – Т. 39, № 5. – С. 320–323.
16. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, А.А. Поцелуев и др. – Кемерово : Кемеровский полиграфкомбинат, 2000. – 245 с.
17. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Несветайло В.Д. Изучение уровня и динамики накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев // Геохимия. – 2002. – № 11. – С. 1238–1245.
18. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований Алтае-Саянской складчатой области. – Новосибирск : Гео, 2002. – 550 с.
19. Скуридин В.С. Способ экстракционного получения технеция-99м и устройство для его осуществления. Патент 2118858 RU. МКИ G21G 1/06, 4/08. – Заявл. 14.10.94; опубл. 10.09.98. – Бюл. № 25.
20. Скуридин В.С., Чибисов Е.В. Экстракционный генератор технеция-99м. Патент 2161132 RU. МКИ C01G 57/00. – Заявл. 14.02.00; опубл. 27.12.00. – Бюл. № 36.